

Comparação de algoritmos empíricos na estimativa da concentração de clorofila-*a* na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo

Frederico de Moraes Rudorff¹

Milton Kampel¹

Salvador A. Gaeta²

Mayza Pompeu²

João A. Lorenzetti¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fmr, milton, loren}@dsr.inpe.br

² Universidade de São Paulo - USP/IO
CEP 05508-120 - São Paulo - SP, Brasil
{sagaeta, pompeum}@usp.br

Abstract. The present work aims to compare the performance of ocean color empirical algorithms to derive chlorophyll-*a* concentrations at the Brazilian Southeast coastal waters based on *in situ* fluorometric and above-water radiometric measurements. Monthly *in situ* data were collected at the Ubatuba-Antares time-series station (23°44'S - 45°00'W), between December 2004 and January 2006. The *in situ* hyperspectral radiometric data were integrated to simulate the spectral bands of the Sea-viewing Wide Field of view Sensor (SeaWiFS) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The empirical algorithms OC2v4, OC4v4 (SeaWiFS) and OC3M (MODIS) were applied to the integrated radiometric data to retrieve chlorophyll-*a* concentrations, which were compared with *in situ* fluorometric measurements. In general, the OC4v4, OC2v4 and OC3M algorithms showed a tendency to overestimate chlorophyll-*a*.

Palavras-chave: Ocean color, chlorophyll, empirical algorithms, Ubatuba, cor do oceano, clorofila, algoritmos empíricos, Ubatuba.

1. Introdução

A rede de observação Antares busca entender a variabilidade espacial e temporal do ambiente costeiro em escala continental e os processos locais, regionais e globais que influenciam os padrões de mudanças. Estão sendo estudados os ecossistemas costeiros da América Latina e do Caribe com ênfase nos produtores primários, através de ações integradas regionalmente. A abordagem inclui o desenvolvimento de séries temporais de dados *in situ* e de sensores remotos orbitais nas regiões costeira e oceânica. Pretende-se integrar as medidas bio-ópticas marinhas *in situ* obtidas nas séries temporais com as informações ambientais históricas e em tempo-quase-real adquiridas por satélites. Um dos objetivos principais da rede Antares é disponibilizar publicamente informações úteis à pesquisa oceanográfica, ao gerenciamento costeiro, à pesca e às atividades de ensino, entre outras.

A partir de dezembro de 2004, teve início a série temporal brasileira de dados *in situ* em Ubatuba, litoral norte de São Paulo. Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de algoritmos empíricos da cor do oceano na estimativa da concentração de clorofila-*a* com base em medidas radiométricas e fluorimétricas *in situ*.

2. Material e Métodos

O conjunto de dados bio-ópticos foi coletado mensalmente na estação fixa de Ubatuba, integrante da rede de observações Antares (23°44'S – 45°00'W). São consideradas neste trabalho 14 campanhas compreendendo o período entre dezembro de 2004 a janeiro de 2006. A localização da estação pode ser visualizada na **Figura 1**. A **Figura 1** também apresenta a distribuição da concentração de clorofila-*a* (CSM) em parte da plataforma continental sudeste do Brasil derivada a partir do sensor de cor do oceano *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), instalado a bordo do satélite Aqua da NASA. Observa-se que as concentrações são máximas próximas à costa, principalmente na entrada da Baía de Guanabara e interior da Baía de Sepetiba, RJ com valores acima de 4 mg m⁻³. O litoral norte de São Paulo também apresenta valores de CSM relativamente altos, entre 1 e 3 mg m⁻³ próximo à costa e em torno da Ilha de São Sebastião. À medida que se afasta da costa, as concentrações vão diminuindo, onde águas com características oligotróficas estão representadas com tonalidades azuladas.

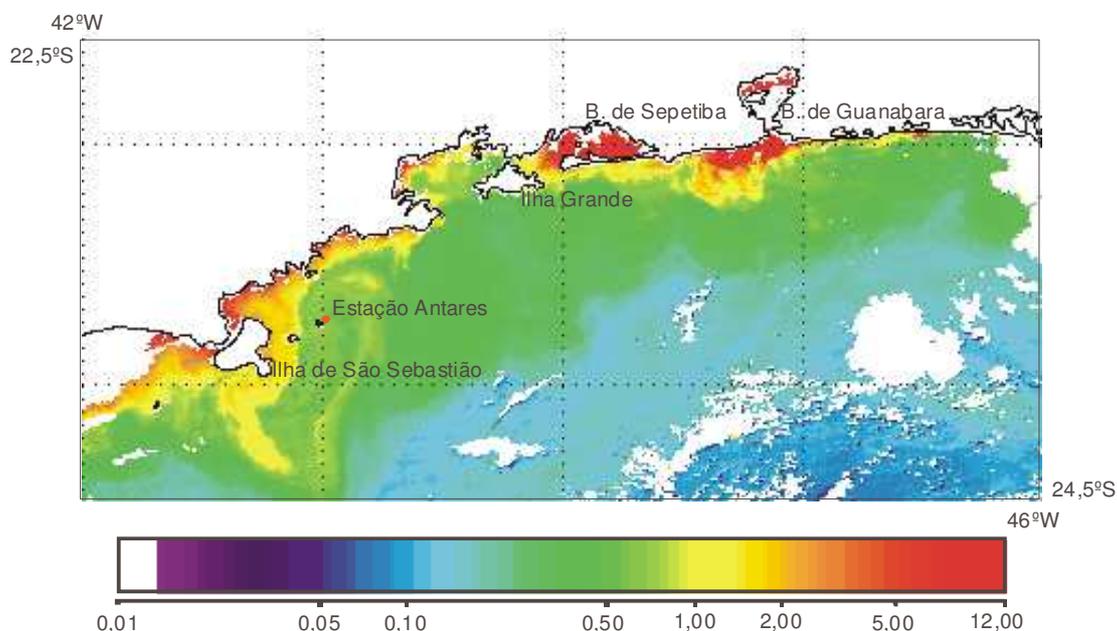


Figura 1. Localização da estação de coleta ANTARES (23°44'S – 45°00'W), sobreposta à imagem MODIS-Aqua de 06/05/2005 representando a distribuição superficial de concentrações de clorofila-*a*. Tabela de cores em escala logarítmica.

Medidas fluorimétricas

Foram coletadas amostras com 250 mL de água da superfície e filtradas por filtros *Whatman* GF/F. Os filtros foram mantidos em nitrogênio líquido e as concentrações de clorofila-*a* determinadas por fluorescência em fluorímetro Turner 10-AU-005 após extração em 5 mL de acetona 90% a -4 °C por 12 horas (Shoaf e Lium 1976, Welschmeyer 1994).

Medidas Radiométricas

Medidas radiométricas sobre a superfície da água foram obtidas com o uso do radiômetro hiperespectral Spectron Modelo SE590 no mesmo ponto das coletas de água. Por utilizar

um polarizador, que visa minimizar os efeitos da reflexão do céu, as medidas radiométricas realizadas a bordo seguiram o protocolo de aquisição sugerido por Fougnie et al. (1999). A faixa espectral amostrada nas coletas foi de 400 a 800 nm com uma resolução média de 5 nm. Os dados hiperespectrais foram então integrados de modo a simular as bandas espectrais dos sensores orbitais de cor do oceano *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) e MODIS, seguindo a técnica de integração de retângulos descrita em (Souto et al. 2005).

A reflectância de sensoriamento remoto, $R_{rs}(\lambda)$ foi calculada através da seguinte razão:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)}, \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $L_w(\lambda)$ é a radiância espectral emergente da água, ou seja, a radiância ascendente logo acima da superfície do mar; e $E_d(\lambda)$ é a irradiância espectral incidente na superfície do mar. $E_d(\lambda)$ foi estimada através da medida da radiância, $L(\lambda)$, de uma placa branca feita de Spectralon (Mobley, 1999). Assim, $E_d(\lambda)$ é dada pela seguinte equação:

$$E_d(\lambda) = L(\lambda) \times fc \times \pi, \quad (\text{Eq. 2})$$

onde fc é um fator de correção determinado em laboratório através da razão entre $L(\lambda)$ da placa de referência utilizada em campo e $L(\lambda)$ de uma placa padrão.

Algoritmos empíricos

Neste trabalho foram utilizados os algoritmos empíricos de cor do oceano *Ocean Chlorophyll 4-band* - OC4 e *Ocean Chlorophyll 2-band* - OC2, ambos na versão 4, referentes ao sensor SeaWiFS e o algoritmo *Ocean Chlorophyll 3-bands* - OC3M, referente ao sensor MODIS para a estimativa das concentrações de clorofila (O'Reilly et al. 2000).

O algoritmo OC2v4 estima a CSM partir da razão de bandas $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ utilizando a função polinomial cúbica modificada:

$$C_a = 10,0^{(0,319 - 2,336R_{2S} + 0,879R_{2S}^2 - 0,135R_{2S}^3) - 0,071}, \quad (\text{Eq. 3})$$

onde $R_{2S} = \log_{10}\left(R_{555}^{490}\right)$.

O algoritmo OC4v4 também relaciona razões de bandas com a clorofila-*a* através de uma única função polinomial, mas emprega a razão de banda máxima determinada como a maior razão (R_{\max}) entre os valores de $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ e $R_{rs}(510)/R_{rs}(555)$. A versão mais recente (O'Reilly et al. 2000) estima a concentração através da seguinte função de quarta ordem:

$$C_a = 10,0^{(0,366 - 3,067R_{4S} + 1,930R_{4S}^2 - 0,649R_{4S}^3 - 1,532R_{4S}^4)}, \quad (\text{Eq. 4})$$

onde $R_{4S} = \log_{10}\left(R_{\max}\right)$.

O algoritmo OC3M também utiliza uma função polinomial de quarto grau a partir das R_{\max} entre $R_{rs}(443)/R_{rs}(550)$ e $R_{rs}(490)/R_{rs}(550)$, seguindo a equação:

$$C_a = 10,0^{(0,283-2,753R_{3M} + 1,457R_{3M}^2 - 0,659R_{3M}^3 - 1,403R_{3M}^4)}, \quad (\text{Eq. 5})$$

onde $R_{3M} = \log_{10}(R_{\max})$.

Comparação dos algoritmos

Os dados fluorimétricos foram então comparados estatisticamente às estimativas obtidas pelos algoritmos empíricos através de análises de correlação e regressão linear. Também foram calculados o erro quadrático médio linearmente transformado (rmse-L) (Carder et al. 2004) e o percentual da diferença média relativa (RDP) através das funções listadas abaixo.

$$rmse - L = 0,5 \left[(10^{+rmse} - 1) + (1 - 10^{-rmse}) \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\log_{10} \left(\frac{Chla_{alg}}{Chla_{insitu}} \right)^2 \right]} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$RDP = \sum_{n=1}^N \left(\frac{Chla_{alg} - Chla_{insitu}}{Chla_{insitu}} \right) \frac{1}{N} \times 100\% \quad (\text{Eq. 8})$$

onde $Chla_{alg}$ é a concentração de clorofila-*a* estimada pelo algoritmo e $Chla_{insitu}$ é a determinada pelo método fluorimétrico.

3. Resultados e Discussão

Durante o período analisado os valores de CSM variaram entre 0,3 e 2,0 mg m⁻³, com valor médio de 0,7 (±0,5) mg m⁻³. De forma geral, as concentrações estiveram abaixo de 0,8 mg m⁻³. Entretanto, apresentaram dois picos de maior concentração: 2 mg m⁻³ em dezembro de 2004 e 1,4 mg m⁻³ em junho de 2005, respectivamente. Estes valores estão dentro da faixa descrita na literatura para águas costeiras da região de Ubatuba, entre 0,31 e 2 mg m⁻³ (Abe 1993, Aidar et al. 1993, Francos 1996, Metzler 1991, Sassi 1975, Sassi e Kutner 1982, Susini 1990).

De forma geral, os algoritmos empíricos aplicados aos dados radiométricos *in situ* superestimaram as concentrações de clorofila (**Figura 2**). O algoritmo que apresentou o melhor desempenho foi o OC3M, com menores valores de rmse-L (0,9), RDP (72,5) e maior r² (0,55) (**Tabela 1**). Os algoritmos OC2v4 e OC4v4 apresentaram resultados semelhantes, sendo que o último teve um desempenho ligeiramente melhor que o primeiro (**Tabela 1**).

Garcia et al. (2006) também avaliaram os algoritmos empíricos OC4v4 e OC2v4 para a região costeira do Atlântico Sudoeste a partir de dados obtidos por uma bóia radiométrica, constatando também uma superestimação da CSM, principalmente nas estações de verão. Todavia, eles obtiveram resultados mais consistentes, com rmse-L de 0,54 e 0,49, RDP de 26,9 e 11,0 e r² de 0,82 e 0,83 para os algoritmos OC4v4 e OC2v4, respectivamente. Ressalta-se que Garcia et al. (2006) trabalharam com 72 amostras, sendo que no presente trabalho apenas 14. Portanto, a menor quantidade de dados pode ser uma das causas pelo desempenho mais fraco, conforme foi apontado pelos parâmetros estatísticos analisados.

Outro fator que pode ter contribuído para o baixo desempenho dos algoritmos na região em estudo é a complexidade das propriedades óticas inerentes. Os algoritmos OC2v4, OC4v4 e OC3M foram desenvolvidos empiricamente para águas do tipo Caso 1, sendo modelados a partir de concentrações de clorofila e de razões das reflectâncias de sensoriamento remoto *in situ*. Esta abordagem funciona bem para águas Caso 1 uma vez que o fitoplâncton e as substâncias covariantes determinam as propriedades óticas da água. Todavia, em águas costeiras, frequentemente a matéria orgânica dissolvida (CDOM) e os detritos não covariam com o fitoplâncton devido à maior complexidade de fontes de componentes opticamente ativos (IOCCG 2000). Segundo Carder et al. (1999), em águas costeiras Caso 2 o CDOM pode inclusive absorver mais luz no azul do que o fitoplâncton. Desta forma, valores mais altos de concentração de clorofila podem ser devido ao efeito do CDOM, uma vez que estes algoritmos empíricos não distinguem entre os dois.

Assim, uma das causas da superestimação dos algoritmos pode ser devido à possibilidade de que a região estudada apresenta características de águas do tipo Caso 2, uma vez que a mesma está inserida em águas costeiras.

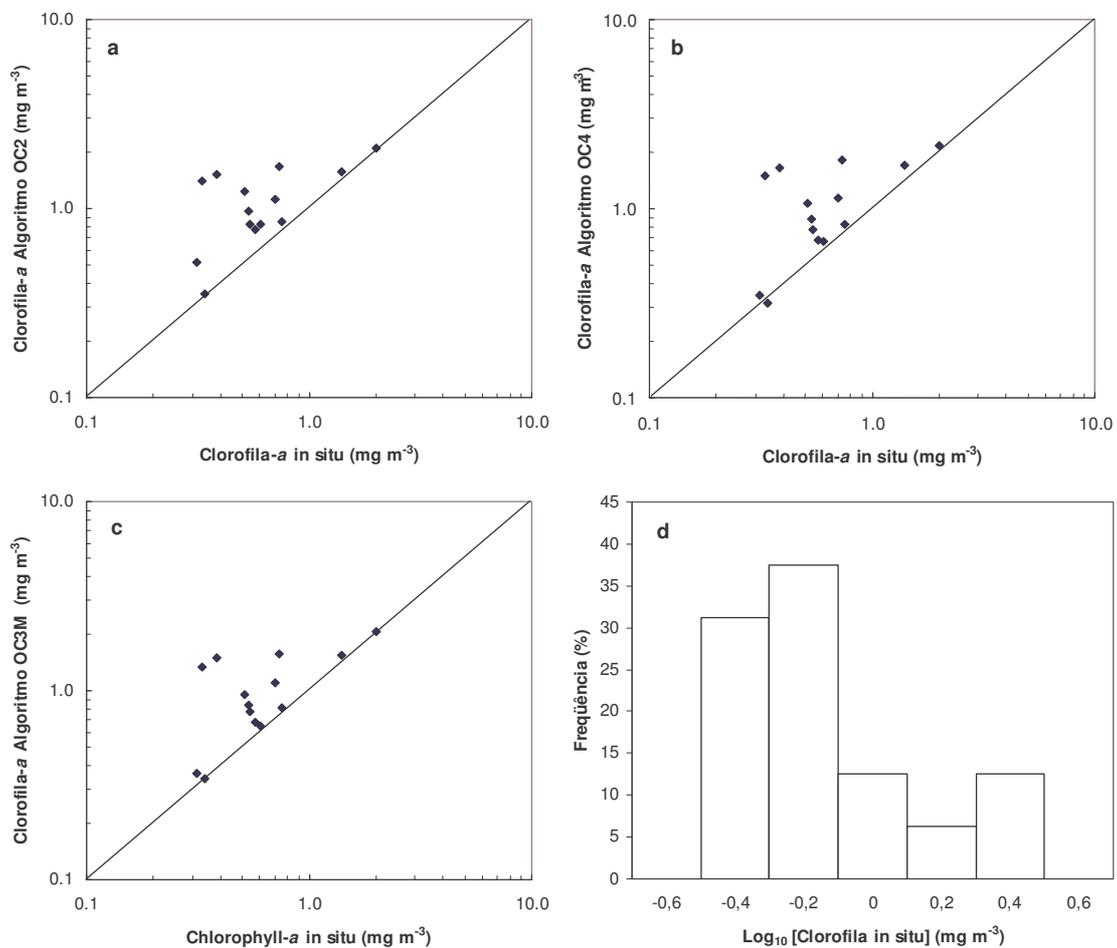


Figura 2. Comparação dos desempenhos dos algoritmos em relação aos dados fluorimétricos. a, b e c: gráficos de espalhamento dos algoritmos OC2v4, OC4v4 e OC3M e as concentrações de clorofila-a fluorimétricas; e d, gráfico de frequência relativa das concentrações de clorofila-a fluorimétricas.

Tabela 1. Comparação dos algoritmos em relação às medidas fluorimétricas.

Algoritmo	rmse-L	RDP	r^2	Declividade	Intersecção	N
OC2v4	1,0	89,6	0,43	0,70	0,637	14
OC4v4	1,0	83,8	0,45	0,81	0,903	14
OC3M	0,9	72,5	0,55	0,90	-0,147	14

Na **Figura 3** está representado a distribuição da R_{rs} espectral para as 14 campanhas. Com base em espectros de diferentes tipos de águas apresentados em IOCCG (2000), pode-se supor que Ub01 (dez./04) representa águas com altas concentrações de sedimento e CDOM, Ub02 (fev./05) com concentrações moderadas de sedimento e CDOM e com algum fitoplâncton e Ub12 (nov./05) águas claras, com baixa concentração de clorofila.

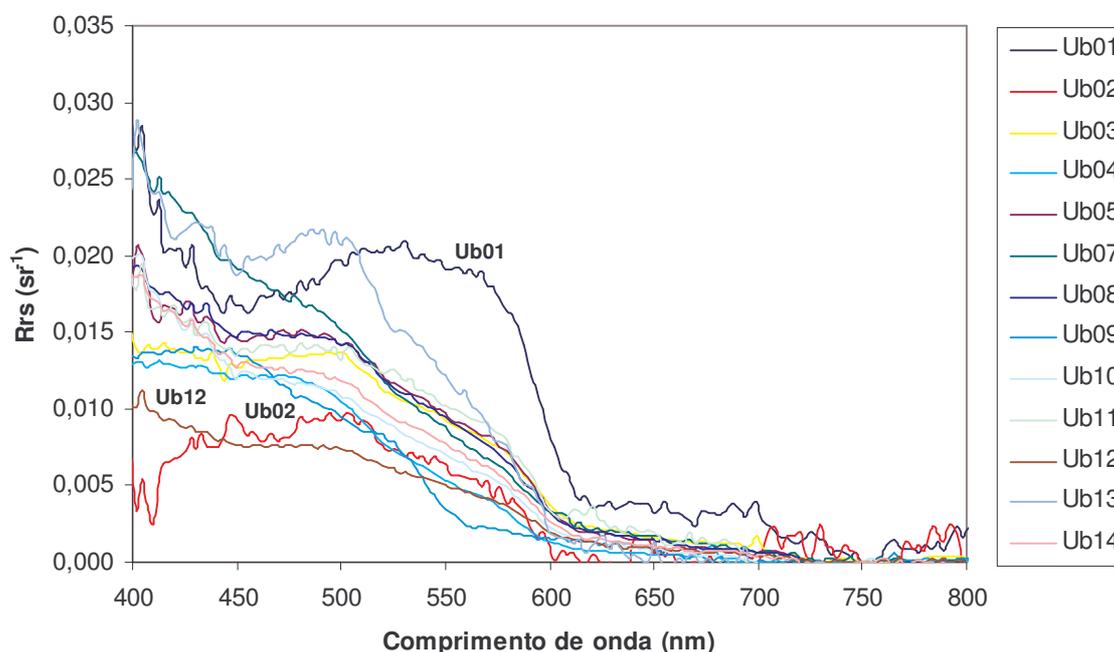


Figura 3. Espectros de reflectâncias de sensoriamento remoto obtidos por radiometria *in situ* acima da superfície da água durante as campanhas da série temporal Antares-Ubatuba, entre dez./04 e jan./06.

4. Considerações finais

Neste trabalho, comparações entre medidas fluorimétricas *in situ* da concentração de clorofila-*a* superficial e estimativas por algoritmos empíricos da cor do oceano empregando dados radiométricos coletados acima da superfície da água foram realizadas na estação costeira Antares-Ubatuba, litoral norte de São Paulo.

De modo geral, os algoritmos SeaWiFS OC4v4 e OC2v4 e MODIS OC3M superestimaram as concentrações de clorofila. O desempenho do OC3M foi um pouco melhor que os do SeaWiFS, todavia, apesar de conseguirem estimar de forma satisfatória as concentrações de clorofila, os parâmetros estatísticos não apresentaram resultados muito consistentes. Isto pode ser devido ao pequeno número de amostras analisadas e/ou devido à complexidade das propriedades ópticas inerentes, característica de regiões costeiras.

Uma das limitações para testar e avaliar o desempenho de algoritmos é a carência de bons conjuntos de dados. Durante as campanhas Antares-Ubatuba também estão sendo

coletadas amostras para determinação dos coeficientes de absorção do fitoplâncton, do CDOM e do material particulado em suspensão. Este conjunto de dados bio-ópticos está sendo processado e analisado e será fundamental para dar continuidade na avaliação dos algoritmos. Além de permitir a avaliação de algoritmos semi-analíticos globais, que levam em consideração outras propriedades ópticas inerentes além da clorofila-*a*, vão permitir uma melhor caracterização dos componentes opticamente ativos da região. Desta forma, será possível ajustar os coeficientes dos algoritmos globais com base nas propriedades ópticas regionais, permitindo assim, melhorar o desempenho dos mesmos na estimação das concentrações de clorofila-*a*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao projeto Antares-Ubatuba e ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo pelos embarques no Navio Oceanográfico Veliger-II; aos pesquisadores, técnicos, bolsistas e alunos que trabalharam nas campanhas de coleta. O autor Frederico M Rudorff agradece ao CNPq pelo suporte financeiro referente ao Programa de Capacitação Institucional.

Referências

- Abe, D. S. **Contribuição das Frações do Micro, Nano e Picofitoplâncton para a Produtividade Primária do Ecossistema Costeiro de Ubatuba, Estado de São Paulo**. 1993. 145 p. (dissertação de mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.
- Aidar, E.; Gaeta, S. A.; Giancesella-Galvão, F.; Kutner, M. B.; Teixeira, C. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-*a* e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. **Publicação Especial Instituto Oceanográfico**, v. 10, p. 9-943, 1993.
- Carder, K. L.; Chen, F. R.; Cannizzaro, J. P.; Campbell, J. W.; Mitchell, B. G. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-*a*. **Advances in Space Research**, v. 33, n.7, p. 1152-1159, 2004.
- Carder, K. L.; Chen, F. R.; Lee, Z. P.; Hawes, S. K.; Kamykowski, D. Semianalytical Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n.C3, p. 5403-5422, 1999.
- Fougnie, B.; Frouin, R.; Lecomte, P.; Deschamps, P.-Y. Reduction of Skylight Reflection Effects in the Above-Water Measurement of Diffuse Marine Reflectance. **Applied Optics**, v. 38, n.18, p. 3844-3856, 1999.
- Franco, M. S. **Variações Diárias Sazonais (Verão e Inverno) do "Standing-Stock" do Fitoplâncton e da Biomassa em Termos de Clorofila-*a* em Duas Estações Fixas Costeiras na Região de Ubatuba: Lat.23°31'S-Long.45°05'W e Lat.23°51'S-Long.45°56'W**. 1996. 123 p. (dissertação de mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.
- Garcia, V. M. T.; Signorini, S.; Garcia, C. A. E.; McClain, C. R. Empirical and semi-analytical chlorophyll algorithms in the southwestern Atlantic coastal region (25-40°S and 60-45°W). **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n.8, p. 1539-1562, 2006.
- IOCCG, 2000, Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters, in SATHYENDRANATH, S., ed., **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**, Dartmouth, IOCCG, p. 140.
- Metzler, P. M. **Estudo da Produtividade Primária e Características Fisiológicas do Fitoplâncton na Região de Ubatuba, São Paulo, através de Curvas de Luz - Fotossíntese**. 1991. (dissertação de mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1991.
- Mobley, C. D. Estimation of the Remote-Sensing Reflectance from Above-Surface Measurements. **Applied Optics**, v. 38, n.36, p. 7442-7455, 1999.

O'Reilly, J. E.; Maritorena, S.; Siegel, D. A.; O'Brien, M. C.; Toole, D.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, F. P.; Strutton, P.; Cota, G. F.; Hooker, S. B.; McClain, C. R.; Carder, K. L.; Müller-Karger, F.; Harding, L.; Magnuson, A.; Phinney, D.; Moore, G. F.; Aiken, J.; Arrigo, K. R.; Letelier, R.; Culver, M., 2000. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: HOOKER, S. B.; FIRESTONE, E. R., eds., **SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, NASA Technical Memorandum**, v. 11: Greenbelt, NASA Goddard Space Center, p. 9 – 27.

Sassi, R. Variação Sazonal do Fitoplâncton e Fatores Ecológicos Básicos da Região do Saco da Ribeira (Lat.23°30'S-Long.45°07'W), Ubatuba, Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, n.31, p. 29-42, 1975.

Sassi, R.; Kutner, M. B. Variação Sazonal do Fitoplâncton da Região do Saco da Ribeira (Lat. 23°30'S - Long. 45°06'W), Ubatuba, Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, n.31, p. 29-42, 1982.

Shoaf, W. T.; Lium, B. W. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. **Limnology Oceanography**, v. 21, p. 926-928, 1976.

Souto, R. P.; Kampel, M.; Brandini, F.; Velho, H. F. d. C.; Stephany, S. Análise comparativa de medições in situ e orbital de de radiâncias do oceano na estimativa de concentração de clorofila-*a*. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3679-3686.

Susini, S. M. M. **Distribuição Sazonal do Fitoplâncton na Radial entre a Ilha Anchieta e a Ilha Vitória (Lat. 23°31'S - Long. 45°06'W a Lat. 23°45'S - Long. 45°01'W) na Região de Ubatuba, São Paulo**. 1990. vol. 1, 201 p.; vol. 2, 171 p. (dissertação de mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1990.

Welschmeyer, N. A. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. **Limnology Oceanography**, v. 39, n.8, p. 1985-1992, 1994.